

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS DE CURITIBANOS
AMANDA CAROLINA MARX BACELLAR KUIAWSKI

**ÍNDICES DE VEGETAÇÃO COMO PARÂMETRO PARA DELIMITAÇÃO DE ZONAS
DE MANEJO**

Curitibanos
2015

AMANDA CAROLINA MARX BACELLAR KUIAWSKI

**ÍNDICES DE VEGETAÇÃO COMO PARÂMETRO PARA DELIMITAÇÃO DE ZONAS
DE MANEJO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Santa Catarina, campus
de Curitibanos, como pré-requisito para obtenção
do Título de Bacharel em Agronomia.
Orientador: Prof. Dr. Eduardo Leonel Bottega

Curitibanos

2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Kuiawski, Amanda Carolina Marx Bacellar

Índices de vegetação como parâmetro para delimitação de zonas de manejo / Amanda Carolina Marx Bacellar Kuiawski ; orientador, Eduardo Leonel Bottega ; coorientador, Jonatas Thiago Piva. - Curitibanos, SC, 2015.

33 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Curitibanos. Graduação em Agronomia.

Inclui referências

1. Agronomia. 2. Agricultura de precisão. 3. Fertilidade do solo. 4. Índices de vegetação. 5. Zonas de manejo. I. Bottega, Eduardo Leonel. II. Piva, Jonatas Thiago. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Agronomia. IV. Título.

Amanda Carolina Marx Bacellar Kuiawski

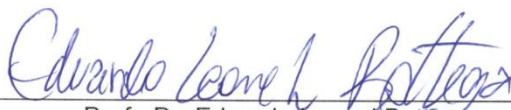
**ÍNDICES DE VEGETAÇÃO COMO PARÂMETRO NA DELIMITAÇÃO DE ZONAS DE
MANEJO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Agrônomo, e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Agronomia.

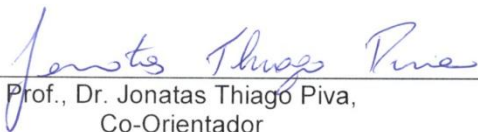
Curitiba, 04 de dezembro de 2015.

Prof. Dr. João Batista Tolentino Júnior
Coordenador do Curso

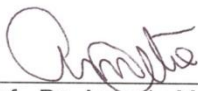
Banca Examinadora:



Prof., Dr. Eduardo Leonel Bottega,
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof., Dr. Jonatas Thiago Piva,
Co-Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof., Dr. Antonio Mendes de Oliveira Neto
Instituto Federal Catarinense

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	9
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	14
3.1 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA CULTURA DA SOJA PARA OS TRÊS ESTÁDIOS DE DESENVOLVIMENTO ESTUDADOS.....	14
3.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS DADOS.....	16
3.3.1 Estádio vegetativo V6.....	17
3.3.2 Estádio reprodutivo R5	18
3.3.3 Estádio reprodutivo R5.5	21
3.4 MAPEAMENTO DA PRODUTIVIDADE	24
3.5 COEFICIENTE DE CONCORDÂNCIA KAPPA E GERAÇÃO DAS CLASSES DE MANEJO	25
3.6 MAPAS DE CLASSES DE MANEJO.....	26
3.7 TESTE T PARA VALORES DE ATRIBUTOS DO SOLO AMOSTRADOS EM CADA CLASSE DE MANEJO	27
4 CONCLUSÃO	29
REFERÊNCIAS.....	31

Índices de vegetação como parâmetro para delimitação de zonas de manejo

Amanda Carolina Marx Bacellar Kuiawski

Resumo

A aplicação de técnicas de agricultura de precisão (AP) no manejo da fertilidade do solo desperta o interesse de agricultores, consultores e empresas prestadoras de serviços. Se avaliar a fertilidade do solo de maneira correta, se aplicar a quantidade correta de fertilizantes e corretivos necessária para se explorar o máximo de produção que aquela cultura pode nos oferecer. Uma técnica vem sendo muito estudada, trata-se da geração de classes para fins de manejo diferenciado. Este estudo objetivou avaliar o desempenho de índices de vegetação na geração de zonas para o manejo diferenciado dos atributos químicos do solo, ou seja, mostrar para o produtor que se ele usar essa técnica ele terá uma diminuição com o custo de fertilizantes e corretivos. O trabalho foi realizado no município de Curitiba, estado de Santa Catarina, em uma área comercial destinada ao cultivo de soja, cebola e alho, totalizando 13 ha, onde foi estabelecida uma malha amostral composta por 50 pontos, georreferenciados, que serviram de base para coleta de dados. A cultura estudada foi à soja, em cada ponto amostral, foi mensurada a reflectância da cultura em três estádios fenológicos diferentes, V6; R5 e R5.5, a mensuração foi utilizando um espectrorradiômetro, foram feitas cinco leituras em cada ponto, onde das mesmas fez-se a média. Após a mensuração da reflectância da cultura, foram calculados através de equações os seguintes índices de vegetação: Índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI), Razão simples (RS), Índice de vegetação da diferença normalizada utilizando a banda do verde (GNDVI), Índice de vegetação resistente à atmosfera na região do visível (VARI) e Índice de vegetação ajustado para o solo (SAVI), calculou-se a produtividade, a qual apresentou variabilidade espacial na área de estudo. Após definido qual mapa de classes apresentou melhor classificação da produtividade, foram identificados os pontos amostrais presentes em cada classe do mapa. Em posse dos resultados da análise de solo de cada ponto amostral, foi aplicado o teste de médias t de Student ($\alpha = 0,05$) para determinar quais atributos do solo (químicos e físicos) o mapa de classes foi capaz de diferenciar. A resposta espectral da cultura da soja foi diferente em função do estágio de desenvolvimento das plantas, no estágio R5.5 todos os índices calculados apresentaram dependência espacial. O mapa de classes de manejo que melhor caracterizou a produtividade de soja foi aquele obtido pela combinação dos índices de vegetação RS_V6 e SAVI_R5.5, os atributos que se diferenciaram foram argila, silte, fósforo e acidez potencial. Se fosse adotado pelo produtor o manejo localizado, ele poderia realizar amostragem simples dentro de cada zona delimitada e destas retirar uma amostra composta para envio ao laboratório de análises. O resultado desta amostra composta poderia ser utilizado como parâmetro para futuras recomendações de doses de fertilizantes, os quais poderiam ser aplicados em doses variadas, considerando cada zona de manejo amostrada.

Palavras-chave: Agricultura de precisão. Fertilidade do solo. *Fuzzy k-means*. Variabilidade espacial.

1 INTRODUÇÃO

A AP consiste de um conjunto de princípios e tecnologias aplicados ao manejo da variabilidade espacial e temporal associada à produção agrícola, objetivando aumentar a produtividade das culturas e a qualidade ambiental (PIERCE; NOWAK, 1999). Em termos práticos, envolve a obtenção e processamento de informações detalhadas e geoespacializadas sobre as áreas de cultivo agrícola, visando definir estratégias de manejo mais eficientes, em especial, o uso racional de insumos (RESENDE *et al.*, 2010).

O manejo correto da fertilidade é responsável pela maior parcela dos ganhos de produtividade obtidos com o uso de práticas culturais recomendadas para as diversas culturas. Ou seja, se avaliar a fertilidade do solo de maneira correta, aplicar a quantidade correta de fertilizantes e corretivos necessária para se obter o máximo de produção que aquela cultura pode nos oferecer (REHAGRO, 2014). Os fertilizantes quando utilizados em excesso, ou de forma errônea, podem trazer impactos negativos para o meio ambiente, por isso o produtor deve fazer o seu uso de forma racional, assim, reduz-se a degradação química, física e biológica do solo, conserva-se a saúde das plantas, garantindo a produtividade das culturas.

A aplicação de técnicas de AP no manejo da fertilidade do solo desperta o interesse de agricultores, consultores e empresas prestadoras de serviços. O ponto de partida é a realização de amostragens que permitam caracterizar a variabilidade espacial dos atributos do solo relacionados à produtividade das culturas numa determinada área. Para tanto, normalmente tem sido coletadas amostras georreferenciadas dispostas numa grade amostral (“grid”), de modo a permitir que os resultados das análises possam ser processados por meio de geoestatística e posteriormente sejam elaborados mapas interpolados que representam a variação espacial nos valores de cada atributo analisado. De posse do resultado de análises de solo, que avaliava fósforo (P), potássio (K) e saturação por bases (V%), por exemplo, é possível gerar mapas de prescrição de fertilizantes e de calcário em quantidades distintas para diferentes partes do talhão, de acordo com a mudança na necessidade de um local para outro dentro da área em questão. Os procedimentos desde a amostragem georreferenciada até a distribuição de corretivos e fertilizantes a taxa variável representam, sem dúvida, o principal serviço de AP oferecido atualmente aos produtores rurais no Brasil (RESENDE *et al.*, 2010).

A tecnologia patenteada para aplicação à taxa variada é uma demonstração concreta do uso integrado de tecnologias para gerir e controlar, de forma mais precisa, a aplicação de fertilizantes considerando a variabilidade espacial do solo, ela considera então a variabilidade espacial dos atributos e prescreve a taxa de insumos de acordo com a necessidade específica de cada

sub-área, também conhecida como zona de manejo. A identificação destas zonas de manejo pode ser realizada com base na mensuração de características do solo, do relevo ou mesmo do comportamento das culturas no campo (uniformidade de estande, população de plantas, produtividade, etc.) (PIERCE, 1999). A utilização de técnicas de mensuração radiométrica da cultura, neste contexto, se destaca, pois além de ser obtida de forma rápida, não destrutiva e com custo baixo, possibilita o cálculo de índices de vegetação.

Os índices de vegetação são modelos matemáticos utilizados na avaliação da cobertura vegetal, geralmente correlacionados com outras variáveis mensuradas em campo (BARBOSA, 2006). Tais índices são obtidos por meio da mensuração da radiância e da reflectância do objeto de estudo ou mesmo pelo valor numérico de imagens digitais (BAUERMANN, 2008). Trata-se de uma importante ferramenta utilizada para análise e detecção de mudanças ocorridas na superfície terrestre, em especial, na cobertura vegetal (LEITE, 2011).

Este estudo teve como objetivo avaliar o desempenho de índices de vegetação em três diferentes estádios fenológicos, para gerar qual zona de manejo foi capaz de diferenciar os teores de nutrientes do solo, para que o produtor possa fazer um manejo diferenciado da sua área.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no município de Curitibanos, estado de Santa Catarina, em uma área comercial destinada ao cultivo de soja, cebola e alho, totalizando 13 ha. Foi estabelecida uma malha amostral composta por 50 pontos, georreferenciados, com espaçamento de 50 x 50 metros, que serviram de base para coleta de dados (Figura 1).

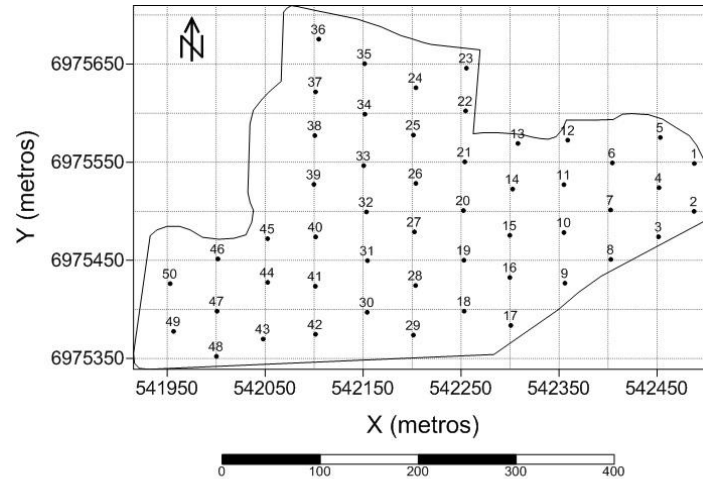


Figura 1: Mapa de localização e espacialização dos pontos amostrais utilizados como referência na coleta de dados.

A cultura estudada foi a soja, cultivar BMX Turbo RR. Em cada ponto amostral foi mensurada a reflectância da cultura em três estádios fenológicos diferentes, V6; R5 e R5.5. Na mensuração da reflectância foi utilizado um espectrorradiômetro modelo FieldSpec® HandHeld 2TM ASD Inc. que atua no intervalo de comprimento de onda entre 300 e 1100 nm, com a resolução espectral de 1nm, composto de uma fibra óptica com campo de visão de 25°. Foram feitas cinco leituras em cada ponto amostral, onde foi feita a média, optou-se fazer cinco leituras para que se tivesse uma melhor representação do dossel.

Após a mensuração da reflectância da cultura, foram calculados os seguintes índices de vegetação: Índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI), Razão simples (RS), Índice de vegetação da diferença normalizada utilizando a banda do verde (GNDVI), Índice de vegetação resistente à atmosfera na região do visível (VARI) e Índice de vegetação ajustado para o solo (SAVI). Para o cálculo dos índices, utilizaram-se as seguintes equações:

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} \quad (1)$$

$$RS = \frac{R}{NIR} \quad (2)$$

$$GNDVI = \frac{NIR - G}{NIR + G} \quad (3)$$

$$VARI = \frac{G - R}{G + R - B} \quad (4)$$

$$SAVI = \frac{NIR - R}{NIR + R + L} \cdot (1 + L) \quad (5)$$

em que;

$NDVI$ = Índice de vegetação da diferença normalizada (ROUSE *et al.*, 1974);

RS = Índice de vegetação da razão simples (PEARSON; MILLER, 1972);

$GNDVI$ = Índice de vegetação da diferença normalizada utilizando a banda do verde (GITELSON *et al.*, 1996);

$VARI$ = Índice de vegetação resistente a atmosfera na região do visível (GITELSON *et al.*, 2003);

$SAVI$ = Índice de vegetação ajustado para o solo (HUETE, 1988);

B = Valor médio da banda do azul;

G = Valor médio da banda do verde;

R = Valor médio da banda do vermelho;

NIR = Valor médio da banda do infravermelho próximo;

L = Coeficiente de ponderação (valor utilizado: 0,25).

O mapeamento da produtividade de soja foi realizado por meio de colheita manual em cada ponto amostral. Foram colhidas três linhas de um metro, equivalente a 1,35 m². As amostras foram debulhadas e pesadas, a umidade dos grãos foi obtida pelo método da capacitância. Do valor da massa de soja foi descontada a massa de água, sendo considerado como valor padrão 13% de umidade. Os valores da massa de grãos corrigidos foram expressos em kg ha⁻¹.

Os resultados obtidos para os índices de vegetação e produtividade foram submetidos à análise estatística descritiva, calculando-se a média, mediana, valor mínimo, valor máximo, desvio padrão, coeficiente de variação, coeficiente de assimetria e de curtose, a fim de caracterizar a distribuição dos dados. A dependência espacial foi avaliada pelos ajustes de variogramas, pressupondo a estacionaridade da hipótese intrínseca, definida pela Equação 6.

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(xi) - Z(xi+h)]^2 \quad (6)$$

em que;

$\hat{\gamma}(h)$ = Semivariância em função da distância de separação (h) entre pares de pontos;

h = Distância de separação entre pares de pontos, m;

$N(h)$ = Número de pares experimentais de observações $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ separados por uma distância h .

Foram testados os modelos gaussiano, esférico e exponencial. Ajustou-se o modelo que apresentar a menor soma dos quadrados do resíduo (SQR). Após a escolha do modelo, foram determinados os parâmetros: efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C$) e alcance (A). O índice de dependência espacial (IDE) foi calculado e classificado, segundo proposta de Zimback (2001), utilizando a Equação 7 e assumindo os seguintes intervalos: dependência espacial baixa para $IDE < 25\%$, moderada para $25\% \leq IDE \leq 75\%$ e forte para $IDE > 75\%$.

$$IDE = \left(\frac{C}{C_0 + C} \right) 100 \quad (7)$$

Uma vez detectada a dependência espacial, foram produzidos os mapas de variabilidade do atributo. A interpolação dos mapas foi realizada utilizando krigagem ordinária. Para as estimativas de valores em locais não amostrados, utilizou-se 16 vizinhos próximos e um raio de busca igual ao valor do alcance encontrado no ajuste do variograma.

A análise da variabilidade espacial dos índices de vegetação e da produtividade da soja foi realizada no programa computacional GS+. Para a geração de classes de manejo e o cálculo do coeficiente de concordância Kappa utilizou-se o programa computacional KrigMe, desenvolvido por Valente (2010).

O programa KrigMe utiliza o algoritmo de classificação *fuzzy k-means* na análise de agrupamento dos dados e geração das classes de manejo. O número de classes de manejo que melhor representam o agrupamento dos dados trabalhados, foi definido em função do Índice de Performance Fuzzy (FPI – “Fuzziness Performace Index”) e Entropia da Partição Modificada (MPE – “Modified Partition Entropy”). Estes índices apresentam valores entre 0 e 1, o número de classes de manejo otimizado é obtido quando ambos os índices são minimizados (SONG *et al.*, 2009).

Foi calculado o erro de classificação entre os mapas gerados (índices de vegetação) e o mapa de classes de produtividade, a fim de se produzir uma matriz de erros. Em posse das matrizes de erros, calculou-se o coeficiente de concordância Kappa para cada classificação realizada. Para calcular o coeficiente Kappa, utilizou-se a Equação 8 (HUDSON; RAMM, 1987).

$$\hat{K} = \frac{n \sum_{i=1}^c x_{ii} - \sum_{i=1}^c x_{i\oplus i}}{n^2 - \sum_{i=1}^c x_{i\oplus i}} \quad (8)$$

em que;

- \hat{K} = Estimativa do coeficiente Kappa;
- x_{ii} = Valor na linha i e coluna i (diagonal) da matriz de erros;
- $x_{i\oplus}$ = Total da linha i ;
- $x_{\oplus i}$ = Total da coluna i ;
- n = Número total de amostras;
- c = Número total de classes.

A maior concordância entre os mapas de classes gerados foi determinada por meio do maior valor da estimativa do coeficiente Kappa, testado pelo teste Z com nível de significância de 5%. Para o cálculo da estatística Z, foi utilizada a Equação 9 (CONGALTON; MEAD, 1983).

$$Z = \frac{\hat{K}_1 - \hat{K}_2}{\sqrt{\text{var}(\hat{K}_1) + \text{var}(\hat{K}_2)}} \quad (9)$$

em que;

- Z = Valor de Z calculado;
- \hat{K}_1 = Estimativa do coeficiente Kappa do classificador numa época, dita 1;
- \hat{K}_2 = Estimativa do coeficiente Kappa do classificador numa época dita 2;
- $\text{var}(\hat{K}_1)$ = Variância da estimativa do coeficiente Kappa do classificador entre mapas de classes, dito 1;
- $\text{var}(\hat{K}_2)$ = Variância da estimativa do coeficiente Kappa do classificador entre mapas de classes, dito 2.

A variância da estimativa do coeficiente Kappa foi estimada de acordo com a Equação 10 descrita por HUDSON; RAMM (1987).

$$\text{var}(\hat{K}) = \frac{1}{n} \left[\frac{\theta_1(1-\theta_1)}{(1-\theta_2)^2} + \frac{2(1-\theta_1)(2\theta_1\theta_2 - \theta_3)}{(1-\theta_2)^3} + \frac{(1-\theta_1)^2(\theta_4 - 4\theta_2^2)}{(1-\theta_2)^4} \right] \quad (10)$$

Os termos θ_1 , θ_2 , θ_3 , e θ_4 foram determinados por meio das Equações 11 a 14:

$$\theta_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^c x_{ii} ; \quad (11)$$

$$\theta_2 = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^c x_{i\oplus} x_{\oplus i} ; \quad (12)$$

$$\theta_3 = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^c x_{ii} (x_{i\oplus} + x_{\oplus i}) ; \quad (13)$$

$$\theta_4 = \frac{1}{n^3} \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^c x_{ij} (x_{j\oplus} + x_{\oplus j})^2 . \quad (14)$$

em que;

x_{ij} = Valor na linha i e coluna j da matriz de erros;

$x_{j\oplus}$ = Total da linha j ; e

$x_{\oplus j}$ = Total da coluna j ;

Para escolha de qual mapa de classes melhor representa a produtividade, os valores de Kappa significativos foram classificados de acordo com limiares propostos por Landis e Koch (1977). Os autores classificam como ruins valores do coeficiente Kappa entre 0,00 e 0,19, razoável entre 0,20 e 0,39, bom entre 0,40 e 0,59, muito bom entre 0,60 e 0,79 e excelente quando o valor for maior ou igual a 0,80. Optou-se por escolher mapas que apresentaram coeficiente Kappa acima de 0,40 e, dentre estes, o que apresentar o maior valor numérico para o coeficiente Kappa.

Após definido qual mapa de classes apresentou melhor classificação da produtividade, foram identificados os pontos amostrais presentes em cada classe do mapa. De cada zona de manejo foi retirada uma amostra composta por outras dez, coletadas de forma aleatória dentro da zona, na profundidade de 0,0 – 0,20 metros. As amostras serão homogeneizadas e enviadas para análise em laboratório. Em posse dos resultados da análise de solo de cada ponto amostral, foi aplicado o teste de médias t de Student ($\alpha = 0,05$) para determinar quais atributos do solo (químicos e físicos) o mapa de classes foi capaz de diferenciar. Antes da aplicação do teste de médias, os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk ($\alpha = 0,05$), os que apresentaram distribuição não normal foram transformados empregando o método Box-Cox. As análises foram realizadas utilizando o suplemento Action® desenvolvido para o Microsoft Excel®.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA CULTURA DA SOJA PARA OS TRÊS ESTÁDIOS DE DESENVOLVIMENTO ESTUDADOS

Os três estádios de desenvolvimento da cultura apresentaram comportamento semelhante, mas com picos de reflectância diferenciado, em especial nos intervalos de comprimento de onda de 550 nm (verde) e 750 nm (infravermelho próximo), o que era esperado, uma vez que, a reflectância na banda do verde é influenciada pelo teor de clorofila na planta e a banda do infravermelho próximo pela reflectância da radiação eletromagnética por parte da estrutura celular da cultura. Na medida em que a cultura avança em seu ciclo de desenvolvimento, a quantidade de clorofila (pigmento) tende a diminuir, sendo os maiores valores observados para o estágio vegetativo e os menores para o estágio reprodutivo. Este comportamento influencia a reflectância da radiação eletromagnética representativa da banda do verde (550 nm).

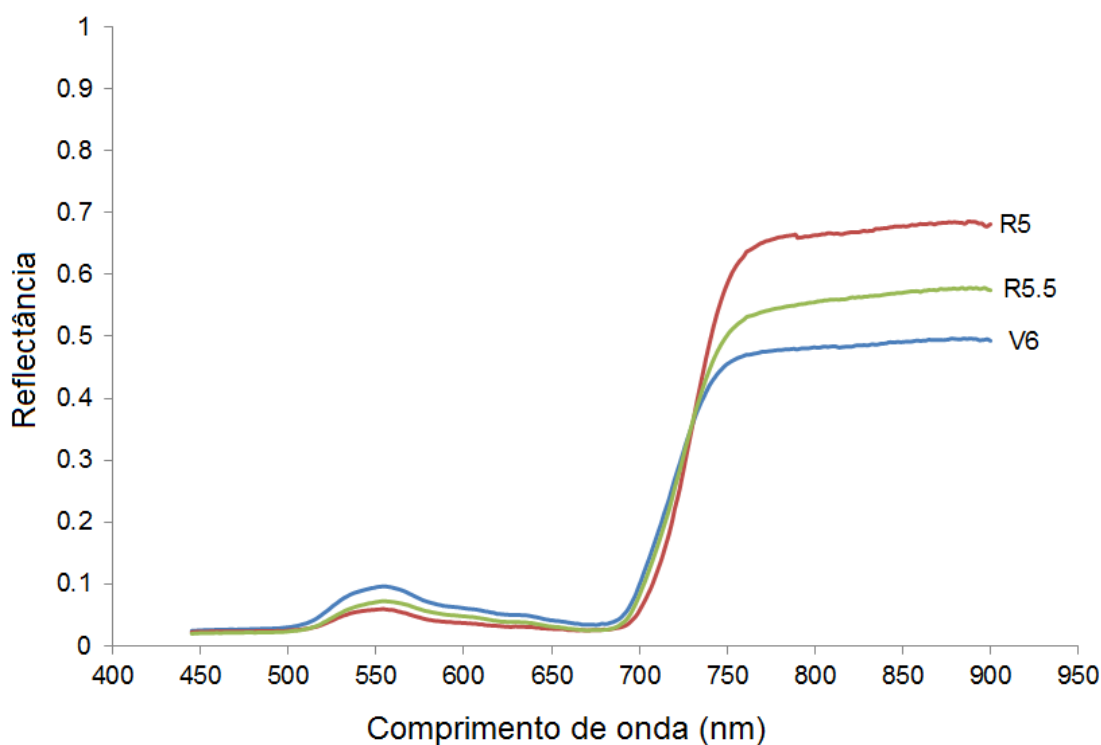


Figura 2. Resposta espectral da cultura da soja para os três diferentes estádios de desenvolvimento estudados.

Nesta região, a maior parte da radiação que incide sobre o dossel vegetativo é absorvida pelos pigmentos fotossintetizantes das folhas. Os pigmentos que mais influenciam a reflectância são as clorofilas a e b, com dois picos de absorção, o maior no comprimento de onda de 680 nm e o menor no comprimento de onda de 480 nm, respectivamente (MOREIRA, 2003).

As curvas espectrais apresentaram um pico na região do verde, próximo a 550nm, exceto para o início de desenvolvimento da cultura. Segundo alguns autores, este pico está relacionado com a presença de Clorofila a e total nas folhas. Ferri (2002) analisou a existência de uma relação entre a concentração de clorofila e a reflectância de plantas de soja. O autor verificou que, com o aumento da concentração de clorofila, houve variações da reflectância em 550nm.

Para os comprimentos de ondas de 530 a 630nm houve diminuição da reflectância devido ao aumento da concentração de clorofila e, também, da estrutura das plantas. Em 670 a 680nm o aumento da concentração de clorofila causou uma variação mínima na reflectância e não significativa. Portanto, a baixa relação entre estas duas regiões do espectro sugere que existe uma influência diferente da concentração de clorofila (ALMEIDA, 2008).

A região do infravermelho próximo compreende toda radiação eletromagnética cuja faixa espectral situa-se entre 700 e 1300 nm. Nesta região, o comportamento da radiação eletromagnética quanto à reflexão, transmissão e absorção é dominado pelas propriedades ópticas das folhas que dependem das estruturas celulares internas (MOREIRA, 2003). Dependendo da estrutura anatômica das folhas, a reflectância pode chegar até 50% e a absorção, menos que 15% (TUCKER; GARATT, 1977). Além disso, nesta região, existe uma contribuição indireta do conteúdo de água da folha, a qual preenche as cavidades de ar, formando um meio líquido no interior da folha. Com isso, ocorre uma diminuição das diferenças no índice de refração do ar e da parede celular hidratada da folha, aumentando a transmitância desta (MOREIRA, 2003).

Em relação à idade da planta, as propriedades ópticas das folhas mudam de acordo com a sua fase de desenvolvimento. Assim, na maturação, ocorre um decréscimo da reflectância na região do visível e um acréscimo na região do infravermelho próximo (Figura 2), devido à existência de um maior número de espaços aéreos intercelulares no mesófilo das folhas maduras. No início da senescência, e em razão da degradação das clorofilas, ocorre uma menor absorção da radiação solar e, conseqüentemente aumento na reflectância na região do visível. Com o avanço gradativo da senescência, observa-se a degradação dos carotenos e morte das células. Nessa fase, ocorre um aumento dos espaços aéreos intercelulares das folhas, e conseqüentemente uma queda da reflectância no infravermelho próximo (MOREIRA, 2003). Este comportamento é evidenciado na Figura 2, onde o pico de reflectância do infravermelho próximo é obtido quando a cultura se encontra em estágio reprodutivo R5, caindo quando esta encontra-se em R5.5.

A reflectância do infravermelho próximo (750 nm) é influenciada pela estrutura celular da planta. Conforme a planta cresce e se desenvolve aumenta-se o número de folhas e ramificações e, conseqüentemente, a quantidade de estrutura celular. No estágio reprodutivo inicial a planta apresenta seu máximo de estrutura celular ativa, o que resulta na máxima reflectância do infravermelho próximo (MOREIRA, 2003).

3.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS DADOS

Na Tabela 1 são apresentados os valores dos parâmetros estatísticos que descrevem a posição e a dispersão das variáveis estudadas. O maior coeficiente de variação (CV%) observado foi de 25,16 e o menor de 1,28, respectivamente para os índices de vegetação RS (soja em estágio V6) e NDVI (soja em estágio R5). Os valores de CV podem ser considerados médios (CV<30%), indicando pouca variação no conjunto de dados.

Sibaldelli (2013) realizou um estudo onde avaliou a área foliar e o comportamento espectral de cultivares de soja sob distintos arranjos de plantas, sendo uma das cultivares estudada a BMX Turbo RR. O autor encontrou valores de NDVI próximos aos encontrados neste estudo, sendo observado o valor de 0,87 no estudo de Sibaldelli (2013) e 0,83 no presente estudo. Outro fato que corrobora com os resultados encontrados neste estudo foi a variação do NDVI de um estágio para o outro da cultura da soja.

Segundo Jensen (2009), o NDVI é bastante relacionado ao IAF, sendo seu valor máximo observado quando a cultura apresenta sua máxima área foliar. Entretanto um dos seus limites é a saturação dos seus dados em relação a altos valores de IAF. Almeida (2008) detectou saturação de NDVI com IAF superior a 4,0 para a cultura de soja em solos com diferentes condições hídricas. A diminuição da sensibilidade do NDVI a altos valores de IAF ocorre devido à reflectância ser atenuada quando a superfície do solo está completamente encoberta pelas folhas. Esta saturação ocorre devido à quantidade de luz vermelha que pode ser absorvida pelas folhas, rapidamente alcançando um pico. Em contraste, a radiação no infravermelho próximo difundida pelas folhas continua a aumentar quando o IAF excede a 3 (MOTOMYIA *et al.*, 2007).

As variações nos valores de GNDVI podem ser explicadas por Dalmolin *et al.*, (2005). Os autores ressaltam que vários elementos que compõem a superfície do solo (matéria orgânica, textura, composição mineralógica, rugosidade e umidade) podem afetar a reflectância do dossel e, por consequência, o GNDVI. Esse conjunto de elementos é denominado de “superfície de fundo” (HUETE, 1985). Esta superfície de fundo, presente na entre linha da cultura quando a mesma ainda não fechou completamente, interfere na resposta espectral do dossel que, por sua vez, afeta a determinação do GNDVI.

Tabela 1. Estatística descritiva dos índices de vegetação estudados: Índice de vegetação da razão simples (RS); Índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI); Índice de vegetação da diferença normalizada utilizando a banda do verde (GNDVI); Índice de vegetação resistente a atmosfera na região do visível (VARI); Índice de vegetação ajustado para o solo (SAVI) e Produtividade de soja (PRD).

Variáveis	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	$\sigma^{(1)}$	CV(%) ⁽²⁾	Cs ⁽³⁾	Ck ⁽⁴⁾	w ⁽⁵⁾
RS_V6	11,79	11,92	4,69	17,26	2,97	25,16	-0,40	-0,25	0,98 ^{ns}

NDVI_V6	0,83	0,85	0,65	0,89	0,05	6,09	-1,88	4,17	0,82*
GNDVI_V6	0,68	0,69	0,54	0,74	0,04	6,17	-1,27	1,99	0,90*
VARI_V6	0,46	0,47	0,20	0,56	0,08	17,70	-1,44	2,27	0,88*
SAVI_V6	0,71	0,71	0,48	0,82	0,07	9,99	-0,81	1,00	0,96 ^{ns}
RS_R5	24,28	24,42	13,71	31,27	3,14	12,92	-0,52	1,65	0,98 ^{ns}
NDVI_R5	0,92	0,92	0,86	0,94	0,01	1,28	-2,21	9,10	0,84*
GNDVI_R5	0,84	0,85	0,75	0,88	0,02	2,44	-1,80	6,52	0,87*
VARI_R5	0,46	0,46	0,39	0,54	0,03	7,00	0,24	-0,10	0,98 ^{ns}
SAVI_R5	0,85	0,85	0,78	0,90	0,03	2,97	-0,35	0,64	0,98 ^{ns}
RS_R5.5	17,29	17,33	13,48	22,48	2,01	11,62	0,35	0,08	0,98 ^{ns}
NDVI_R5.5	0,89	0,89	0,86	0,91	0,01	1,36	-0,24	-0,13	0,98 ^{ns}
GNDVI_R5.5	0,78	0,78	0,72	0,82	0,02	2,80	-0,53	-0,07	0,97 ^{ns}
VARI_R5.5	0,46	0,45	0,39	0,58	0,04	8,61	1,35	1,82	0,87*
SAVI_R5.5	0,79	0,79	0,74	0,85	0,03	3,77	0,20	-0,38	0,98 ^{ns}
PRD ⁽⁶⁾	4168,66	4063,33	3423,33	5216,20	613,44	14,72	0,46	-0,59	0,96 ^{ns}

⁽¹⁾Desvio padrão; ⁽²⁾Coefficiente de variação; ⁽³⁾Coefficiente de assimetria; ⁽⁴⁾Coefficiente de curtose; ⁽⁵⁾Normalidade Shapiro-Wilk: ns distribuição normal; * distribuição não normal à 5% de probabilidade; ⁽⁶⁾Produtividade de soja (kg ha⁻¹)

3.3 ANÁLISE DA DEPENDÊNCIA ESPACIAL DOS ÍNDICES NDVI, RS, GNDVI, VARI, SAVI PARA OS TRÊS ESTÁDIOS DE DESENVOLVIMENTO DA CULTURA DA SOJA.

3.3.1 Estádio vegetativo V6

As mensurações da reflectância espectral da cultura em estágio vegetativo V6 e posterior cálculo dos índices de vegetação demonstraram haver dependência espacial dos índices RS e SAVI. Os índices de vegetação NDVI, GNDVI e VARI não apresentaram dependência espacial. Quando a dependência espacial não é detectada, o mapa temático que exhibe a variabilidade espacial do atributo em análise não pode ser produzido, pois não se tem o ajuste de um modelo teórico que descreva a semivariância empírica dos dados, o que se faz necessário para realização de estimativas de valores em locais não amostrados.

A não detecção da variabilidade espacial está associada a dois motivos: 1) A dependência espacial não existe ou 2) A quantidade de pontos amostrais utilizados não foi suficiente para detectá-la. No presente estudo, considerando que dois dos índices estudados apresentaram dependência espacial, o motivo 2 pode ser descartado. O modelo Esférico foi o que melhor descreveu o comportamento espacial dos índices RS e SAVI. Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros dos semivariogramas teóricos e da análise de validação cruzada referente a modelagem da dependência espacial que descrevem a variabilidade espacial dos índices RS e SAVI.

Tabela 2. Parâmetros dos semivariogramas teóricos e da análise de validação cruzada referente a modelagem da dependência espacial dos índices de vegetação mensurados no estágio V6.

Índice	Parâmetros do semivariograma
--------	------------------------------

	Modelo	$C_0^{(1)}$	$C_0+C^{(2)}$	$A_0^{(3)}$	$R^{2(4)}$
SAVI	Esférico	0,00079	0,00298	124,10	0,58
RS	Esférico	0,48000	6,57200	155,80	0,95
Parâmetros da validação cruzada					
	$CR^{(5)}$	$EP^{(6)}$	$EPP^{(7)}$	$Y^{(8)}$	R^2
SAVI	0,472	0,338	0,051	0,38	0,04
RS	0,679	0,195	2,185	3,85	0,22

⁽¹⁾Efeito pepita; ⁽²⁾Patamar; ⁽³⁾Alcance (m); ⁽⁴⁾Coefficiente de determinação; ⁽⁵⁾Coefficiente de regressão; ⁽⁶⁾Erro padrão; ⁽⁷⁾Erro padrão de predição; ⁽⁸⁾Intercepto.

Na Figura 3 são apresentados os mapas temáticos de distribuição espacial. Pode-se notar que os índices de vegetação SAVI e RS demonstram que o desenvolvimento da cultura pode não ser uniforme na área de estudos.

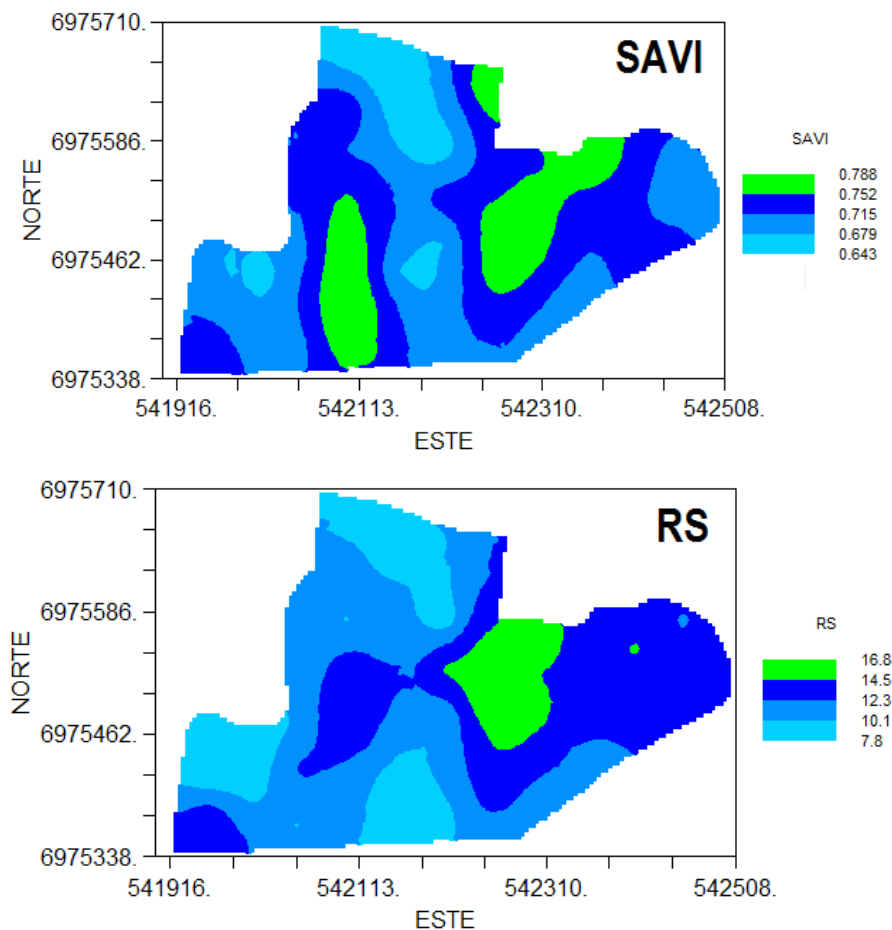


Figura 3. Mapas temáticos para análise de dependência espacial dos índices de vegetação RS e SAVI.

3.3.2 Estádio reprodutivo R5

Para o estágio reprodutivo R5, foi detectada dependência espacial para os índices de vegetação NDVI, GNDVI, RS e SAVI. O índice VARI novamente não apresentou dependência espacial. O aparecimento de dependência espacial neste estágio (reprodutivo) demonstra que, no decorrer do desenvolvimento da cultura, alguns fatores afetaram de forma diferenciada determinadas regiões do campo produtivo, provocando variações nas plantas que foram detectadas pela mensuração da reflectância. Somente o índice de vegetação NDVI apresentou ajuste de modelo Exponencial, para os demais, o modelo Esférico foi o que melhor descreveu a variabilidade espacial.

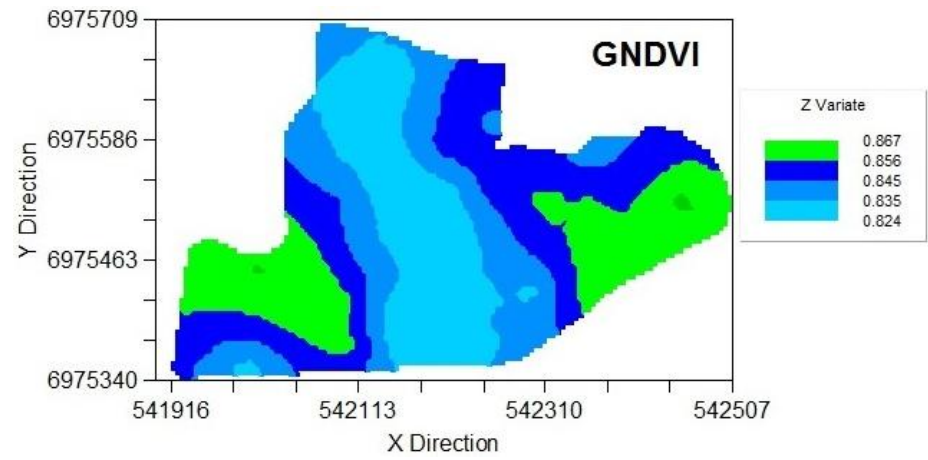
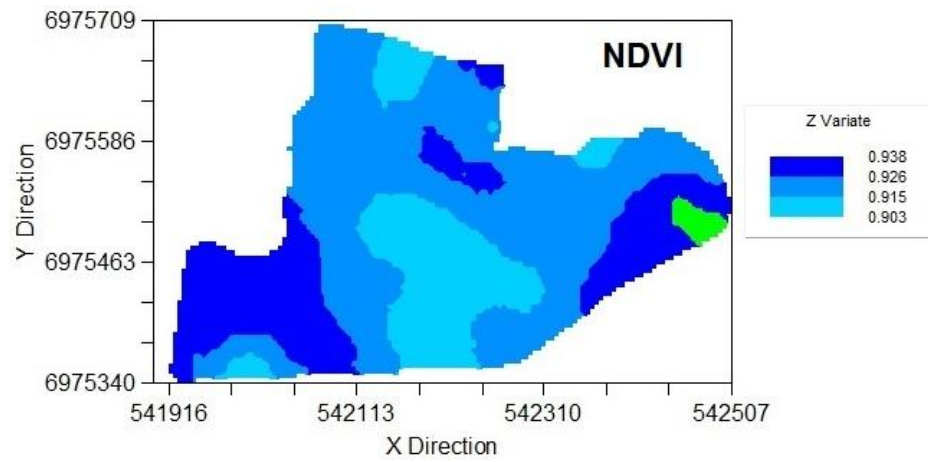
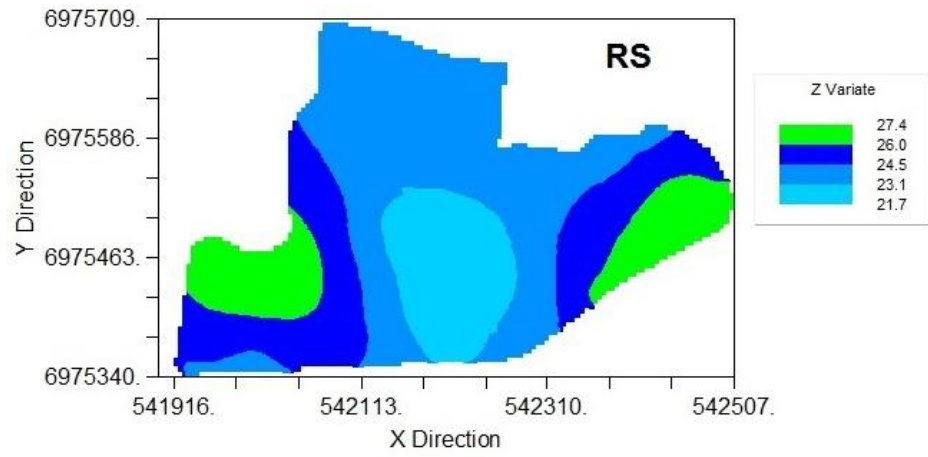
Na Tabela 3 são apresentados os parâmetros dos semivariogramas teóricos e da análise de validação cruzada referente a modelagem da dependência espacial que descrevem a variabilidade espacial dos índices NDVI, GNDVI, RS e SAVI.

Tabela 3. Parâmetros dos semivariogramas teóricos e da análise de validação cruzada referente a modelagem da dependência espacial dos índices de vegetação mensurados no estágio R5.

Índice	Parâmetros do semivariograma				
	Modelo	$C_0^{(1)}$	$C_0+C^{(2)}$	$A_0^{(3)}$	$R^{2(4)}$
SAVI	Esférico	0,00008	0,00069	124,30	0,71
RS	Esférico	4,34000	8,68100	274,70	0,87
NDVI	Exponencial	0,00001	0,00010	60,90	0,78
GNDVI	Esférico	0,00009	0,00032	177,70	0,88
Parâmetros da validação cruzada					
	$CR^{(5)}$	$EP^{(6)}$	$EPP^{(7)}$	$Y^{(8)}$	R^2
SAVI	0,608	0,228	0,023	0,33	0,13
RS	0,982	0,286	2,476	0,45	0,20
NDVI	0,638	0,214	0,009	0,33	0,16
GNDVI	0,763	0,210	0,015	0,20	0,22

⁽¹⁾Efeito pepita; ⁽²⁾Patamar; ⁽³⁾Alcance (m); ⁽⁴⁾Coefficiente de determinação; ⁽⁵⁾Coefficiente de regressão; ⁽⁶⁾Erro padrão; ⁽⁷⁾Erro padrão de predição; ⁽⁸⁾Intercepto.

Na Figura 4 são apresentados os mapas temáticos de distribuição espacial. Exceto para o índice SAVI, os demais índices demonstraram concordância na distribuição de frequência dos valores espacialmente, ou seja, locais de concentração de valores elevados e baixos são similares nos mapas.



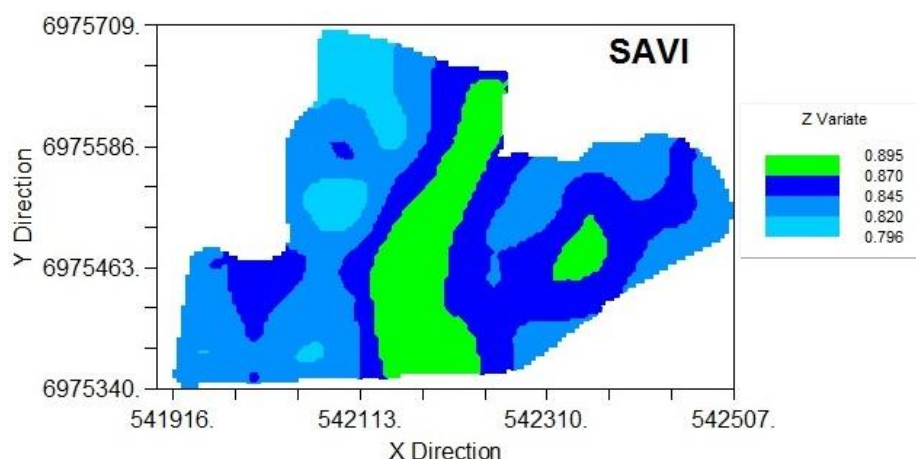


Figura 4. Mapas temáticos para análise de dependência espacial dos índices de vegetação RS, NDVI, GNDVI e SAVI.

3.3.3 Estádio reprodutivo R5.5

No estágio reprodutivo R5.5, foi detectada dependência espacial para todos índices de vegetação estudados. Na Tabela 4 são apresentados os parâmetros dos semivariogramas teóricos e da análise de validação cruzada referente a modelagem da dependência espacial que descrevem a variabilidade espacial dos índices NDVI, GNDVI, RS, VARI e SAVI.

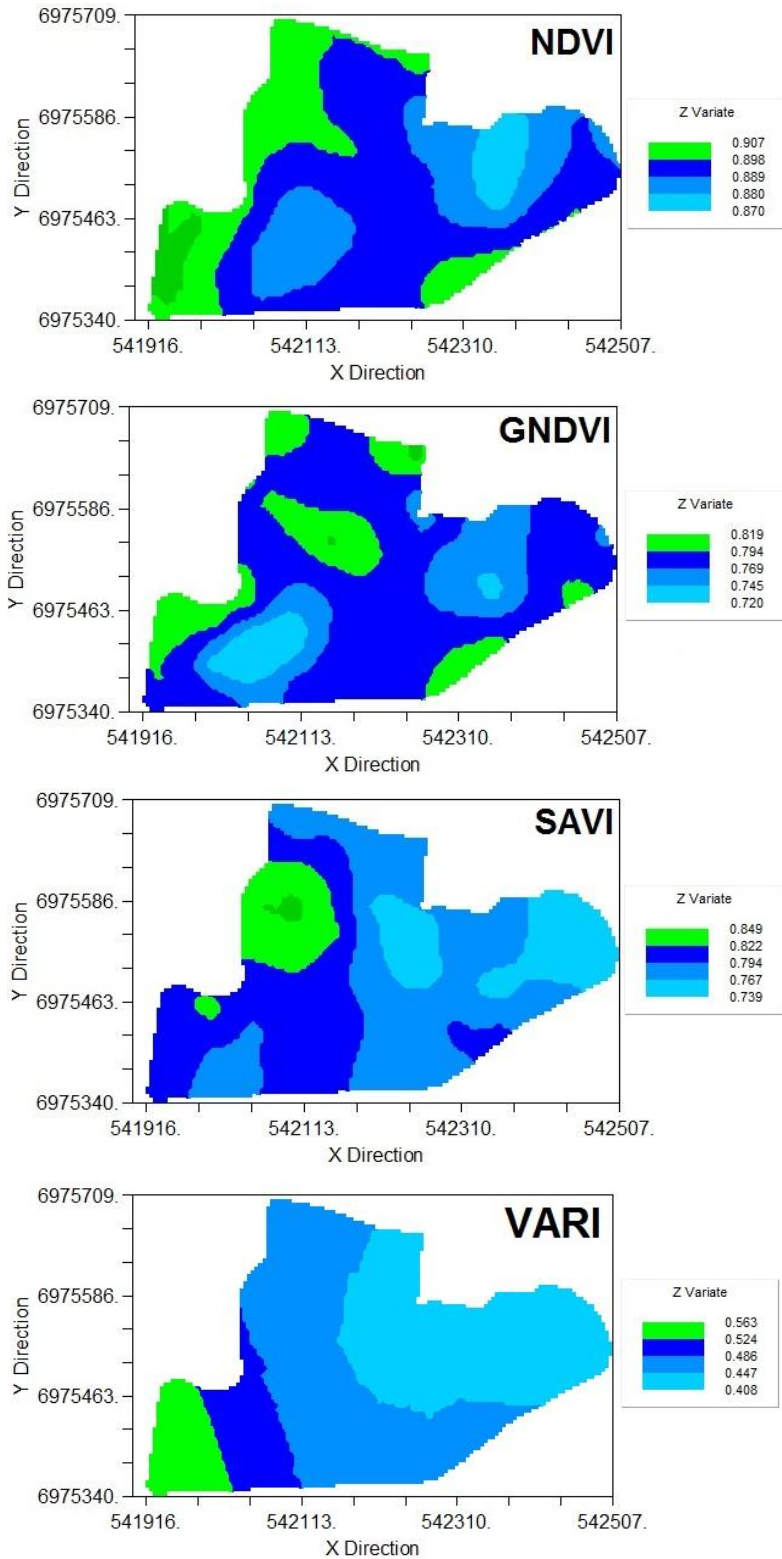
Tabela 4. Parâmetros dos semivariogramas teóricos e da análise de validação cruzada referente a modelagem da dependência espacial dos índices de vegetação mensurados no estágio R5.5.

Índice	Parâmetros do semivariograma				
	Modelo	$C_0^{(1)}$	$C_0+C^{(2)}$	$A_0^{(3)}$	$R^{2(4)}$
NDVI	Esférico	0,00005	0,00016	161,00	0.57
GNDVI	Esférico	0,00000	0,00049	97,90	0.43
SAVI	Exponencial	0,00000	0,00080	100,00	0.88
VARI	Gaussiano	0,00037	0,00578	472,70	0.99
RS	Esférico	0,03000	3,87100	116,20	0.99
	Parâmetros da validação cruzada				
	$CR^{(5)}$	$EP^{(6)}$	$EPP^{(7)}$	$Y^{(8)}$	R^2
NDVI	0,982	0,237	0,010	0,02	0,26
GNDVI	0,847	0,219	0,019	0,12	0,24
SAVI	1,051	0,098	0,015	-0,04	0,72
VARI	0,983	0,093	0,022	0,01	0,70
RS	0,934	0,168	1,566	1,28	0.40

⁽¹⁾Efeito pepita; ⁽²⁾Patamar; ⁽³⁾Alcance (m); ⁽⁴⁾Coefficiente de determinação; ⁽⁵⁾Coefficiente de regressão; ⁽⁶⁾Erro padrão;

⁽⁷⁾Erro padrão de predição; ⁽⁸⁾Intercepto.

Na Figura 5 são apresentados os mapas temáticos de distribuição espacial. Neste estágio de desenvolvimento da planta todos os índices apresentaram os menores valores numéricos em áreas semelhantes da lavoura.



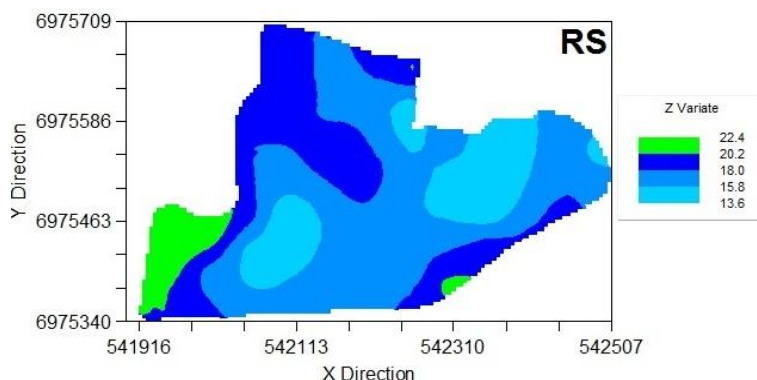


Figura 5. Mapas temáticos para análise de dependência espacial dos índices de vegetação RS, NDVI, GNDVI, VARI e SAVI.

As mensurações da reflectância espectral da cultura em estágio vegetativo V6 demonstraram haver dependência espacial dos índices RS e SAVI, para o estágio reprodutivo R5, foi detectada dependência espacial para os índices de vegetação NDVI, GNDVI, RS e SAVI, já no estágio reprodutivo R5.5, foi detectada dependência espacial para todos índices de vegetação estudados.

Trabalhos feitos em área de cana-de-açúcar apresentaram uma amplitude de valores de NDVI entre 0,21 a 0,49, com média de 0,40 e desvio-padrão de 0,05. Esses valores são considerados médios e representam áreas com menor porte vegetativo e mais dessecadas corroborando com Lucas & Schuler (2007) que concluíram que o NDVI da cana-de-açúcar começa a cair a partir do sétimo mês do ciclo da cultura. Ramme (2008) observou, analisando diferentes variedades de cana-de-açúcar, que as diferenças entre solos, estágios de corte e variedades, influenciam na forma de curva do perfil temporal do NDVI sendo mais visualmente perceptível na medida em que essas diferenças são combinadas, porém Lopes et al. (2011) concluíram que existe uma relação direta da densidade da vegetação da cana-de-açúcar com o NDVI. Na classificação para o coeficiente de variação (CV), os valores obtidos do NDVI apresentaram baixa variabilidade, onde para a cultura da soja também apresentou uma baixa variabilidade.

Desta forma, para a avaliação da variabilidade e dependência espacial dos atributos estudados foram estimados semivariogramas experimentais dos atributos que apresentaram dependência espacial. O modelo que melhor se ajustou ao semivariograma experimental para o NDVI foi o esférico. Este modelo é o mais utilizado para a descrição de variáveis relacionadas às ciências do solo, característico de variáveis que apresentam mudanças abruptas no espaço. Já nesse trabalho no estágio reprodutivo R5 o melhor modelo que se ajustou para o NDVI foi o exponencial, e no estágio R.5 foi o esférico (ZANZARINI *et al.*, 2013).

3.4 MAPEAMENTO DA PRODUTIVIDADE

A produtividade de soja apresentou variabilidade espacial na área de estudo, com valores variando de 3.423,33 à 5.216,20 kg ha⁻¹, comparando com base na produtividade de Santa Catarina esses valores são excelentes, sendo que a média do estado é de 3.000,00 kg/ha. O modelo que melhor descreveu o comportamento espacial da produtividade na área de estudo foi o Gaussiano (Tabela 5), com coeficiente de determinação do modelo (R^2) equivalente à 0,973. O erro observado para estimativas de valores de produtividade em locais não amostrados foi de 495,429 kg ha⁻¹, de acordo com a análise de validação cruzada (Tabela 5). O mapa da variabilidade espacial da produtividade (Figura 6) evidencia uma área da lavoura com produtividade superior à 4.499 kg de soja por hectare e área com produtividades inferiores à 3.762 kg de soja por hectare, essa variação pode ser explicada pelo fato da área não ser homogênea e apresentar diferentes condições em cada ponto amostral. Demonstrando o potencial desta ferramenta como base para investigação localizada dos fatores responsáveis pela sazonalidade na produtividade.

Tabela 5. Parâmetros dos semivariogramas teóricos e da análise de validação cruzada referente a produtividade da soja na área estudada.

	Parâmetros do semivariograma				
	Modelo	$C_0^{(1)}$	$C_0+C^{(2)}$	$A_0^{(3)}$	$R^{2(4)}$
PRD	Gaussiano	115000,00000	422800,00000	92,20	0,97
	Parâmetros da validação cruzada				
	$CR^{(5)}$	$EP^{(6)}$	$EPP^{(7)}$	$Y^{(8)}$	R^2
PRD	0,884	0,171	495,429	548,50	0,35

¹⁾Efeito pepita; ²⁾Patamar; ³⁾Alcance (m); ⁴⁾Coeficiente de determinação; ⁵⁾Coeficiente de regressão; ⁶⁾Erro padrão; ⁷⁾Erro padrão de predição;

⁸⁾Intercepto.

O mapa evidencia as regiões que apresentaram maior produtividade e as regiões que apresentaram menor produtividade, essa variação se dá pelo fato das diferenças de condições na área para o desenvolvimento da cultura. Em análise visual, comparando o mapa de produtividade com os mapas de variabilidade espacial dos índices de vegetação para os diferentes estádios da cultura, observa-se que o mapa do índice de vegetação GNDVI no estágio R5 é o que mais se assemelha ao mapa de produtividade.

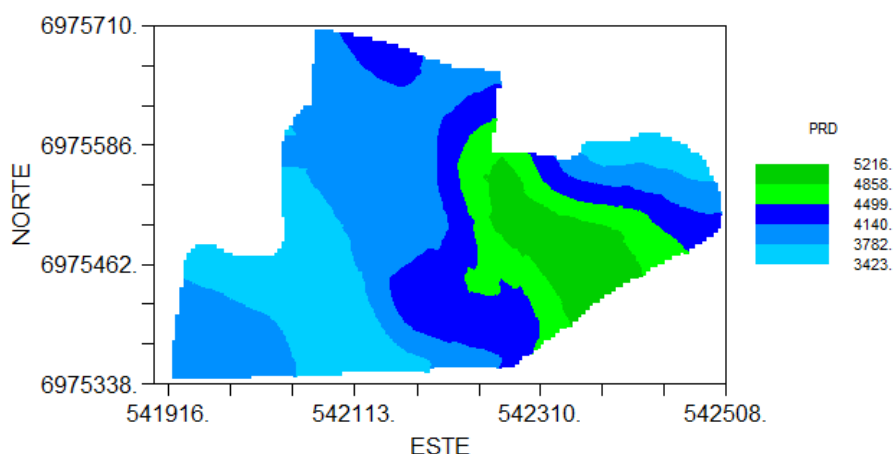


Figura 6. Mapa temáticos para análise de dependência espacial da produtividade de soja na área estudada.

3.5 COEFICIENTE DE CONCORDÂNCIA KAPPA E GERAÇÃO DAS CLASSES DE MANEJO

Na Tabela 6 são apresentados os coeficientes de concordância Kappa entre os mapas de classes de manejo (2, 3, 4 e 5 classes) gerados com dados de produtividade e aqueles gerados para as demais variáveis estudadas. De acordo com o critério de seleção adotado para escolha do mapa de classes de manejo que melhor descreve a produtividade da área, ou seja, coeficiente de concordância Kappa acima de 0,40, classificado como bom (LANDIS; KOCH, 1977), os únicos mapas de classes de manejo que atenderam este critério foram:

- Para divisão da área em 2 classes de manejo: índice de vegetação da razão simples (RS), soja em estágio V6; índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI), soja no estágio R5.5; e o mapa resultante da combinação destas duas variáveis (RS_V6 + SAVI_R5.5).
- Para divisão da área em 3 classes de manejo: índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI), soja no estágio R5.5

Dentre os quatro mapas de classes de manejo que atenderam o primeiro critério de seleção, ou seja, coeficiente Kappa acima de 0,40, aquele a ser escolhido como base para o manejo diferenciado é o mapa de classes que apresentou coeficiente Kappa de 0,55, maior coeficiente numérico entre os quatro, atendendo o segundo critério de seleção (Tabela 6).

Tabela 6. Coeficiente de concordância Kappa entre o mapa de classes de manejo gerados a partir dos valores de produtividade e os mapas de classes de manejo gerados com valores dos índices de vegetação calculados nos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura da soja.

IV ⁽¹⁾	Nº de Classes de Manejo (Produtividade)			
	2	3	4	5
RS_V6	0,41^b	0,21 ^b	0,17 ^b	0,22 ^a
SAVI_V6	0,24 ^c	0,13 ^c	0,11 ^c	0,18 ^b

RS_R5	-0,04 ^{ns}	0,18 ^b	0,22 ^b	0,15 ^c
SAVI_R5	0,21 ^c	0,15 ^c	0,17 ^b	0,15 ^c
NDVI_R5	-0,05 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,17 ^b	0,13 ^c
GNDVI_R5	0,16 ^d	0,19 ^b	0,20 ^a	0,17 ^b
RS_R5.5	0,27 ^c	0,24 ^b	0,26 ^a	0,17 ^b
SAVI_R5.5	0,42^b	0,44^a	0,18 ^b	0,24 ^a
NDVI_R5.5	0,18 ^d	0,20 ^b	0,21 ^b	0,12 ^c
GNDVI_R5.5	0,18 ^d	0,17 ^c	0,14 ^c	0,22 ^a
VARI_R5.5	-0,06 ^{ns}	0,18 ^b	0,27 ^a	0,16 ^b
RS_V6+SAVI_R5.5	0,55^a	0,38 ^a	0,18 ^b	0,22 ^a

⁽¹⁾ Índices de vegetação. Letras iguais na mesma coluna indicam valores de kappa iguais e diferentes de zero entre as classes de manejo, pelo teste Z ao nível de 5% de probabilidade. ^{ns}Valor de Kappa não significativo ao nível de 5% de probabilidade.

3.6 MAPAS DE CLASSES DE MANEJO

Na Figura 7 são apresentados os mapas de classes de manejo que apresentaram coeficiente de concordância Kappa acima de 0,40 e o mapa de classes de manejo produzido com os valores de produtividade de soja. Conforme apresentado anteriormente, o maior coeficiente de concordância Kappa foi obtido entre os mapas de Produtividade (divisão em duas classes; 2C) e o mapa de classes de manejo gerado pela combinação de índices RS_V6 + SAVI_R5.5. Estes índices nos seus respectivos estádios de desenvolvimento da soja foram os que apresentaram maior concordância com o mapa de produtividade, sendo observado um valor de Kappa igual a 0,55.

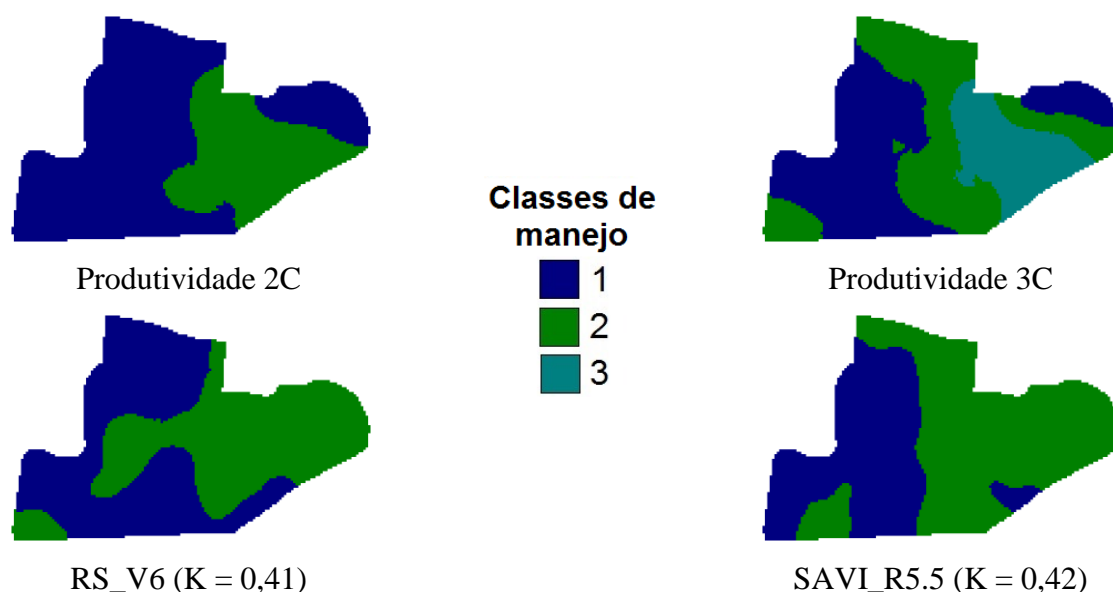




Figura 7. Mapas de classes de manejo gerados com dados de produtividade de soja e índices de vegetação.

Os custos envolvidos nos esquemas das amostragens e das análises de solo tem se mostrado como gargalo na adoção de técnicas de agricultura de precisão, sendo questionado pelos agricultores, quanto à sua viabilidade prática e econômica. Um grande número de produtores e provedores de serviço começaram a considerar o uso de imagem aérea para orientar os locais de amostragens e diminuir custos de coletas e análises (SCHEPERS *et al.*, 1999; WAGNER, 1999).

Luchiari Junior *et al.* (2005) destacam em seu estudo que o uso de nutrientes dentro do conceito de zonas de manejo deve focar vários aspectos. A demanda por nutrientes pelas culturas depende de vários fatores, dentre eles, da cultura e suas variedades, o potencial de rendimento e qualidade dos grãos, da distribuição de chuvas e do potencial produtivo do solo. Os principais atributos do solo que determinam seu potencial produtivo são aqueles responsáveis por manter a água no solo e fornecer nutrientes.

3.7 TESTE T PARA VALORES DE ATRIBUTOS DO SOLO AMOSTRADOS EM CADA CLASSE DE MANEJO

Na Tabela 7 é apresentada a estatística descritiva e o teste de média para os valores de atributos do solo amostrados em cada classe de manejo. A delimitação do campo de produção em classes de manejo utilizando os índices de vegetação da razão simples (RS) com a soja em estágio V6 e o índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) com a soja em estágio R5.5 foi capaz de diferenciar significativamente os atributos: argila, silte, fósforo e acidez potencial.

Tabela 7. Estatística descritiva e teste de média t de Student para os atributos do solo amostrados em cada classe de manejo.

Atributos	ZM1 ⁽¹⁾			ZM2 ⁽²⁾			p-valor $\alpha = 0,05$
	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	
Argila ⁽³⁾	707,08	630	855	731,04	655	805	0,04*
Silte ⁽³⁾	263,38	120	346	238,25	159	318	0,03*
Areia ⁽³⁾	29,63	24	36	30,88	24	45	0,15 ^{ns}
pH ⁽⁴⁾	5,84	5,4	6,5	5,82	4,9	6,9	0,43 ^{ns}
M.O. ⁽⁵⁾	36,46	28	43	34,83	29	43	0,06 ^{ns}
P ⁽⁶⁾	39,25	20	75	69,92	34	122	4,1E-07*

K ⁽⁷⁾	3,25	1,5	6,7	3,45	1,4	6,1	0,17 ^{ns}
Ca ⁽⁸⁾	84,29	61	104	81,33	46	112	0,24 ^{ns}
Mg ⁽⁹⁾	26,58	19	34	27,21	15	43	0,37 ^{ns}
Al ⁽¹⁰⁾	0,15	0	1,3	0,74	0	10,3	0,09 ^{ns}
H+Al ⁽¹¹⁾	20,96	29	71	52,04	23	94	0,03*
CTC ⁽¹²⁾	165,17	143	187	163,92	142	190	0,37 ^{ns}
SB ⁽¹³⁾	114,13	84	137	112	63	156	0,36 ^{ns}
V ⁽¹⁴⁾	69,21	54	82	67,79	40	85	0,31 ^{ns}

⁽¹⁾Classe de manejo 1; ⁽²⁾Classe de manejo 2; ⁽³⁾g dm⁻³; ⁽⁴⁾pH em água; ⁽⁵⁾Matéria orgânica (g dm⁻³); ⁽⁶⁾Fósforo (mg dm⁻¹); ⁽⁷⁾Potássio (mmol_c dm⁻³); ⁽⁸⁾Cálcio (mmol_c dm⁻³); ⁽⁹⁾Magnésio (mmol_c dm⁻³); ⁽¹⁰⁾Alumínio (mmol_c dm⁻³); ⁽¹¹⁾Acidez potencial (mmol_c dm⁻³); ⁽¹²⁾Capacidade de troca de cátions (mmol_c dm⁻³); ⁽¹³⁾Soma de bases (mmol_c dm⁻³); ⁽¹⁴⁾Saturação por bases (%); ^{ns}Médias iguais pelo teste t de Student; *Médias diferentes pelo teste t de Student

Embora não tenham apresentado diferença significativa pelo teste t, pode-se observar que o p-valor dos atributos Matéria Orgânica (p-valor = 0,06) e Alumínio (p-valor = 0,09), considerando uma probabilidade de 10% ($\alpha=0,10$), as zonas de manejo seriam capazes de diferenciá-los. Se fosse adotado pelo produtor o manejo localizado, o mapa de zonas de manejo produzido utilizando os índices de vegetação da razão simples (RS) com a soja em estágio V6 e o índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) com a soja em estágio R5.5, poderia servir de base para amostragem de solo na área de cultivo. O produtor poderia realizar amostragem simples dentro de cada zona delimitada e destas retirar uma amostra composta para envio ao laboratório de análises. O resultado desta amostra composta poderia ser utilizado como parâmetro para futuras recomendações de doses de fertilizantes, os quais poderiam ser aplicados em doses variadas, considerando cada zona de manejo amostrada. A partir dessas informações o produtor pode fazer a aplicação localizada de fertilizantes e corretivos em cada zona de manejo, pois em uma determinada zona de manejo ele pode usar menos insumos agrícolas do que na outra, e isso traz um benefício para ele que é a redução do custo com fertilizantes e corretivos.

4 CONCLUSÃO

A resposta espectral da cultura da soja foi diferente em função do estágio de desenvolvimento das plantas no qual foi mensurada.

Os índices de vegetação calculados foram capazes de capturar a variabilidade espacial da cultura da soja, sendo que no estágio R5.5 todos os índices calculados apresentaram dependência espacial.

A produtividade da soja apresentou variabilidade espacial na área de estudo, sendo observados locais de maior e menor produtividade.

O mapa de classes de manejo que melhor caracterizou a produtividade de soja foi aquele obtido pela combinação dos índices de vegetação da razão simples (RS_V6) e o índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI_R5.5), apresentando concordância de 55%.

Vegetation index as parameter for delineation of management zones

Amanda Carolina Marx Bacellar Kuiawski

Abstract

The application of precision agriculture techniques (AP) in the management of soil fertility arouses the interest of farmers, consultants and service providers. To evaluate soil fertility correctly, apply the correct amount of fertilizers and needed to explore the maximum production that culture can offer. A technique has been widely studied, it is the generation of classes for different management purposes. This study aimed to evaluate the performance of vegetation indices to generate areas for differentiated management of soil chemical properties, that is, show the producer that if he uses this technique it will decrease the cost of fertilizers and lime. The study was conducted in the municipality of Curitibanos, State of Santa Catarina, in a commercial area dedicated to soy cultivation, onion and garlic, totaling 13 ha, where a sampling grid consisting of 50 points, georeferenced was established, which served as the basis for data collect. The culture was studied soy in each sample point, the culture was measured reflectance at three different growth stages, V6; R5 and R5.5, the measurement was using a spectroradiometer, five readings were made at each point where the same has the average. After measuring the reflectance of the crop, were calculated through equations the following vegetation indices: Vegetation Index (NDVI), simple ratio (RS), the normalized difference vegetation index using the band Green (GNDVI) vegetation Index resistant to the atmosphere in the visible region (VARI) and adjusted vegetation index to soil (SAVI), we calculated productivity, which presented spatial variability in the study area. After defining which classes map showed better classification of productivity, the sampling points were identified present in each class map. In possession of the results of the soil analysis each sample point, the means of Student's t test ($\alpha = 0.05$) was used to determine which soil properties (chemical and physical) the class map was able to differentiate. The spectral response of the soybean crop was different depending on the plant developmental stage, the R5.5 stage all calculated indexes showed spatial dependence. The map management classes that best characterized the soybean yield was that obtained by combining the RS_V6 vegetation indices and SAVI_R5.5, the attributes that differed were clay, silt, phosphorus and potential acidity. If it were adopted by the producer site specific management, you could perform simple sampling within each defined area and these remove a sample to send to the laboratory for analysis. The result of this composite sample could be used as a benchmark for future recommendations of fertilizer doses, which could be applied in varying doses, considering each sampled zone management.

Keywords: Fuzzy k-means. Precision agriculture. Soil fertility. Spatial variability.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, T.S. **Respostas espectrais da soja sob diferentes condições hídricas e de preparo do solo**. 2008. 100p. Dissertação (Mestrado em sensoriamento remoto) – Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- BARBOSA, K.M.N. **Monitoramento especial de biomassa e carbono orgânico da vegetação herbácea de várzea na Amazônia Central**. 2006. 131 f. Tese (Doutorado) Curitiba: Universidade Federal do Paraná.
- BAUERMANN, G.C. **Uso de imagens de sensores remotos na estimativa de características dendrométricas de povoamentos de eucalipto**. 2008. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria.
- BERNARDES, M. S. Fotossíntese no dossel das plantas cultivadas. In: CASTRO, P. R. **Ecologia da produção agrícola**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa do Potássio e do Fosfato, 1987. 249 p.
- CONGALTON, R.G.; MEAD, R.A. A quantitative method to test for consistency and correctness in photointerpretation. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.49, n.1, p.69-74, 1983.
- DALMOLIN, R. S. D.; GONÇALVES, C. N.; KLAMT, E.; DICK, D. P. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 2, p. 481-489, 2005.
- FERRI, C. P. **Utilização da reflectância espectral para a estimativa de pigmentos fotossintéticos em dosséis de soja [glycine max (L.), merrill]**. S.J. dos Campos, INPE, 2002. 152f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – INPE, São José dos Campos, 2002.
- GITELSON, A.A.; KAUFMAN, Y.J.; MERZLYAK, M.N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**. v.58, p.289-298, 1996.
- GITELSON, A.A.; et al. Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. **Geophysical Research Letters**, v.30, n.5, p.52 (1-4), 2003.
- HUDSON, W.D.; RAMM, C.W. Correct formulation of the kappa coefficient agreement. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. v.53, p.421-422. 1987.
- HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v.25, p. 295–309, 1988.
- HUETE, A. R. Spectral response of a plant canopy with different soil background. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 17 p. 37-53, 1985.
- JENSEN, J.R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2ed. São José dos Campos, Parêntese, 604p., 2009.
- LANDIS, J.R.; KOCH, G.G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v.33, 1977.
- LEITE, D.M. **Avaliação da compactação do solo por meio de imagens digitais em diferentes sistemas de preparo do solo na cultura do feijão**. 2011. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Viçosa: Universidade Federal de Viçosa.
- LUCAS, A. de A.; SCHULER, C. A. B. Análise do NDVI/NOAA em cana-de-açúcar e Mata Atlântica no litoral norte de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, p.607-614. 2007.

LOPES, H. L.; et al. Espacialização da umidade do solo por meio da temperatura da superfície e índice de vegetação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, p.973-980, 2011.

LUCHIARI JUNIOR, A.; BORGHI, E.; AVANZI, J. C.; FREITAS, A. A.; BORTOLON, L.; BORTOLON, E. S. O.; UMMUS, M. E.; INAMASU, R. Y. Zonas de Manejo: teoria e prática. **Agricultura de precisão: um novo olhar**, cap. 6, pg. 60-64, 2005.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 2 ed. Viçosa: UFV, 2003. 370p.

MOTOMIYA, A.V.A.; BELLAMINUT, C.E.C.; MOLIN, J.P.; CHIAVERATO, E.J.; ECHEVARRIA, P.B.; COLACO, A.F. Determinação da intensidade de infestação de nematóide em algodoeiro sob diferentes doses de nitrogênio por meio de um sensor óptico ativo. **Anais... VI Congresso Brasileiro de Algodão**, Uberlândia, 2007.

PIERCE, F.J.; NOWAK, P. Aspects of precision agriculture. **Advance in Agronomy**, v. 67, p.1-85, 1999.

PEARSON, R.L.; MILLER, L.D. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short-grass Prairie, Pawnee National Grassland, Colorado: 8th international symposium on remote sensing of environment, **Proceedings...** p. 1357-1381. 1972.

RAMME, F. L. P. **Perfis temporais NDVI e sua relação com diferentes tipos de ciclos vegetativos da cultura da cana-de-açúcar**. Campinas: FEAGRI/UNICAMP, 2008. 103p. Tese Doutorado

REHAGRO. **Leis da Fertilidade do Solo: conceitos para alcançar máxima produtividade**. 2014. Disponível em: <http://ruralcentro.uol.com.br/analises/leis-da-fertilidade-do-solo-conceitos-para-alcancar-maxima-produtividade-4730>. Acesso em: 15 out. 2015.

RESENDE, A. V. de; SHIRATSUCHI, L. S.; COELHO, A. M.; CORAZZA, E. J.; VILELA, M. F.; INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C.; BASSOI, L. H.; NAIME, J. de M. Agricultura de precisão no Brasil: avanços, dificuldades e impactos no manejo e conservação do solo, segurança alimentar e sustentabilidade. In: XVIII REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 18, Teresina, 2010. **Anais...** Teresina: Embrapa Meio-Norte: Universidade Federal do Piauí, 2010.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W.; HARLAN, J.C. **Monitoring the vernal advancement of retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation**. NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD, 371p., 1974.

SIBALDELLI, A. et al.,. **Área foliar e comportamento espectral de cultivares de soja sob distintos arranjos de plantas**. 2013. VIII Jornada Acadêmica da Embrapa Soja.

SONG, X.; WANG, J.; HUANG, W.; LIU, L.; YAN, G.; PU, R. The delineation of agricultural management zones with high resolution remotely sensed data. **Precision Agriculture**, v.10, p.471-487, 2009.

SCHEPERS, J. S.; SHANAHAN, J. F.; LUCHIARI JUNIOR, A. **Precision Agriculture as a tool for sustainability**. In: GALANTE, E.; SCHEPERS, J. S.; WERNER, D.; WERRY, P. A. T. J. (Eds.). Biological Resource Management: Connecting Science and Policy. INRA Editions-Springer, 2000. p.129-138

STEFFEN, C. A.; MORAES, E. C. Introdução à radiometria. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7., 1993, Curitiba. **Anais...**Curitiba, 1993. p. 2-12.

TUCKER, C. J.; GARATT, M. W. Leaf optical system modeled as a stochastic process. **Applied Optics**, v. 16, p. 635 - 642, 1977.

VALENTE, D. S. M. **Desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão para definir zonas de manejo em cafeicultura de precisão**. 2010. 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Viçosa: Universidade Federal de Viçosa.

WAGNER, G. L. **A producers view-charting the course for site-specific agriculture**. Bloomington: SOILTEQ, 1999. Charting the Course for Site-Specific Agriculture - Presentation and Executives Summaries.

ZANZARINI, F.V.; PISSARRA, T.C.T.; BRANDÃO, F.J.C.; TEIXEIRA, D.D.B. Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat/ETM+ com atributos do solo. **Revista Brasileira de engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.6, p.608–614, 2013.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. 2001. 114 f. Tese (Livre-Docência) Botucatu: Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.